青土湖土壤剖面盐分特征及其定量表述研究

刘秀强[1,2]， 陈 喜[1,2]， 张阳阳[1,2]， 程勤波[3]

（1. 天津大学地球系统科学学院表层地球系统科学研究院，天津 300072；2. 天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室，天津 300072；3. 河海大学水文水资源学院，江苏 南京 210098）

摘 要：选取石羊河流域下游青土湖芦苇区与荒漠植被过渡区为研究区，采集24个样点不同深度土样和地下水水样，测定土壤含盐量和质地、地下水埋深和矿化度等环境要素，分析芦苇区与荒漠植被过渡区土壤剖面含盐量分布特征及其主要影响因素和定量表述式。结果表明：(1) 土壤剖面盐分聚集在芦苇区主要为平均型，荒漠过渡区主要为表聚型（0～20 cm）和中聚型（20～60 cm）；(2) 土壤盐分（S）随地下水矿化度（m）与埋深（h）之间的比值呈指数型关系式（$S=ae^{bm/h}$）；(3) 随着m/h值的增大，芦苇区盐分聚型从平均型到中聚型，荒漠过渡区从平均型到中聚型再到表聚型的方式过渡；(4) 维持芦苇和荒漠典型植被（如白刺）生长的土壤表层含盐量分别不超过2 g·kg^{-1}、6 g·kg^{-1}时，地下水临界埋深为1.15 m和2.37 m，可为该地区生态地下水位调控和植被恢复提供科学依据。

关键词：芦苇；荒漠植被；盐分分布；土壤质地；地下水；青土湖

在干旱地区，内陆河流域分布着众多尾闾湖，随着绿洲开发大量拦截和消耗地表水和地下水，造成尾闾湖萎缩、甚至消亡，已严重影响了荒漠绿洲的生态稳定性。为了恢复尾闾湖及其生态功能，近年来通过压缩内陆河流域中游绿洲面积，增加向尾闾湖的生态输水，尾闾湖周边地下水位和土壤盐分发生变化，引发植物群落的演替，迫切需要研究湖泊湿地向荒漠过渡区的土壤盐分分布规律及其影响要素，为该地区生态恢复提供科学依据。

干旱半干旱地区土壤盐渍化是引发土地退化严重的问题之一[1]。石羊河流域是我国干旱内陆河区人口密度最大、水资源供需矛盾最为突出、人类活动引发生态环境恶化最为严重的流域之一[2]。20世纪50年代以来，民勤绿洲的扩张，特别是修建红崖山水库阻断下游河道的来水，青土湖退化、萎缩严重，原来发育的湿生、盐生植被逐渐衰退。2010年以来，人工输水措施的实行，青土湖逐渐得到恢复，水文、土壤、植被发生演变。随着水域面积增加、地下水位抬升，青土湖水面边缘土壤细粒及养分出现富集，也引发土壤次生盐渍化，植物群落呈现草甸–盐化草甸–荒漠三个梯度层[3]。输水促进了芦苇等湿生植物生长、荒漠植物种退化，形成以白刺为代表的单一群落向芦苇草甸、盐化草甸等多样化群落演替[4-7]。西北其他湖泊周边植被也随水盐梯度呈现特定的分布规律，如在地下水和土壤盐分的影响下，西北巴拉嘎斯湖从干涸湖床到湖滨，依次为芦苇、盐爪爪、芨芨草、红砂和小针茅的环状分布[8]，生态输水后，塔里木河下游的台特玛湖周边植被向以芦苇为主的盐渍化低地草甸方向发展[9]，土壤化学性质的空间变化与植被覆盖度和植被类型的分布密切相关[10-11]。在干旱半干旱地区的湖区，地下水和土壤盐分的变化影响着植被的分布。

土壤中盐分运移与土壤质地、地下水埋深和矿化度等因素有关[12-15]。在干旱内陆河灌区，土壤剖面盐分与地下水埋深、地下水矿化度定量关系做了大量的研究，根据实测数据拟合得出：土壤盐分与地下水矿化度和埋深呈指数关系[13-15]，被用于灌区排水沟设计和地下水管理。付秋萍等[13]在新疆干旱内陆河灌区，得出0～30，0～60，0～100 cm土壤含盐量分别与地下水矿化度和地下水埋深呈显著的指数函数关系，进而推出三者的指数函数关系式；吕云海等[14]通过分析新疆于田绿洲0～60 cm土

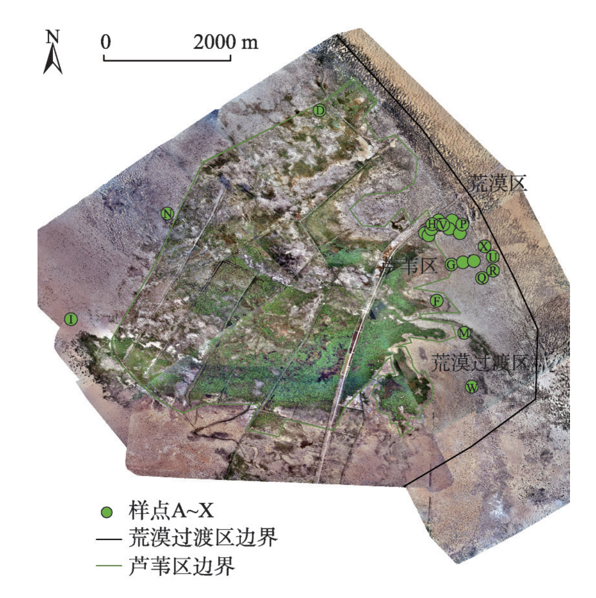
收稿日期：2019-11-06； **修订日期：**2020-07-14
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0406101)资助
作者简介：刘秀强(1994-)，男，硕士研究生，主要从事生态水文学研究. E-mail: liuxiuqiang@tju.edu.cn
通讯作者：陈喜. E-mail: xi_chen@tju.edu.cn

壤剖面含盐量与地下水埋深和矿化度关系，进而根据作物耐盐度得出地下水位临界埋深；管孝艳等[15]对内蒙古河套灌区研究表明，土壤剖面含盐量及其与地下水埋深关系还受灌溉影响，因此，不同季节土壤含盐量和地下水埋深空间分布存在差异。由于土壤剖面含盐量的分布不均匀性，土壤剖面盐分聚集在近地表不同深度。如张光辉等[16]对环渤海低平原区127个监测点土壤剖面60 cm内全盐量分析，按盐分聚集位置划分为表聚型(0～20 cm)、中聚型(20～45 cm)和底聚型(>45 cm)；姚荣江等[17]通过对黄河三角洲地区典型地块土壤盐渍剖面(0～180 cm)的聚类分析，提出除了上述3种类型外，还有平均型类型；白由路等[18]对黄淮海平原近100个样点土壤剖面(0～200 cm)盐分分布的聚类分析，还提出了平衡型类型，且这些类型随降水入渗、漫水灌溉和蒸散作用等影响而相互转换[16-19]。相对于内陆河农灌区，尾闾湖湿地植被向荒漠过渡区植被的演变、地下水埋深和矿化度、土壤质地等空间变化更为显著。目前，关于土壤剖面盐分分布特征及其影响要素之间关系的系统分析和定量表述的研究报道很少。故此，本文选取青土湖湿地水生植被(芦苇)及其周边荒漠过渡区为研究区，开展典型剖面土壤特性、盐分以及地下水位、矿化度等观测和分析，对比不同植被覆盖和土壤质地条件下，盐分分布规律及其影响因素，并确定其定量表述式，为青土湖周边生态环境演变规律的分析提供参考依据。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

青土湖是石羊河流域下游尾闾湖泊，位于甘肃省民勤县，地处巴丹吉林、腾格里两大沙漠交汇的中间地带。年均气温为7.6 ℃，年均降水量110 mm左右，年均潜在蒸发量2600 mm以上[20]。由于强烈蒸发，青土湖区土壤盐渍化程度高。2010年实施青土湖输水工程以来，青土湖水域面积逐年增大，2018年水域面积已达到26.67 km^2(图1)，地下水平均埋深由2010年的3.78 m上升为2018年的2.92 m。输水前，青土湖区干涸，植被主要为白刺群落(*Nitraria tangutorum*)以及少量盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等盐生植物。输水后，随着湖水水面扩大，芦苇群落(*Phragmites australis*)迅速扩大，同时



注：由于采样密集，点A、B、C、E、J、K、L、O、H、V、P在图中标注有重合。

图1 研究区及样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

地下水位抬升显著，在芦苇湿地向荒漠过渡区的土壤次生盐渍化加重，造成白刺等植物死亡[21]。

1.2 研究方法

2019年7月中旬至8月，采用无人机航拍青土湖周边覆被分布，根据影像图和实地调查，研究区分为芦苇区和荒漠过渡区(图1)。湖区附近优势植被芦苇覆盖度高；从芦苇区到荒漠过渡区，地下水矿化度和埋深加大，植被覆盖度逐渐降低，优势植被为白刺，伴生有盐爪爪、猪毛菜、柽柳等旱生、盐生植被。在荒漠过渡区外为荒漠区，地下水埋深大(>4 m)，植被稀疏。

在青土湖芦苇区和荒漠区选取24个采样点(图1、表1)，样点A～H位于芦苇区、I～X位于荒漠过渡区。在样点处人工开挖1～2.2 m深的土壤剖面，直至潜水位；地下水埋深大于2.2 m的样点，采用土钻获取地下水埋深数据。用土壤温湿测量仪实测土壤剖面含水率、温度等，并测量地下水埋深、矿化度。采集土样时，根据干旱区土壤发育条件，将土壤剖面划分为表层(0～20 cm)、中层(20～60 cm)和底层(>60 cm)[22]，每个土层间隔10～20 cm取土样并封袋，将取回的土样自然风干，采用Beckman Coulter激光粒度仪分析土壤粒径，按照美国农业部制定的粒径分级标准[23]确定土壤样品中黏粒、粉粒和砂粒含量。

表1 采样点信息

Tab. 1 Sampling sites information

编号	植被情况	土壤类型	剖面深度/cm	地下水埋深/cm	地下水矿化度/(g·L^{-1})	表土层含盐量/(g·kg^{-1})
A	少量盐地碱蓬	表层砂土,底层壤土	140	145	54.70	1.56
B	芦苇稀疏	砂土	120	120	7.41	0.37
C	芦苇茂盛	砂土	100	100	–	1.92
D	芦苇稀疏	壤土、砂土参杂	70	70	–	6.56
E	芦苇稀疏	表层砂土,中层壤土,底层砂土	120	120	0.41	0.28
F	芦苇茂盛	壤土	150	150	2.86	1.35
G	芦苇稀疏	砂土	140	140	1.96	0.49
H	芦苇稀疏	壤土	140	140	5.50	0.72
I	白刺茂盛	表层砂土,底层壤土	180	250	52.18	6.21
J	白刺茂盛	砂土	200	210	3.17	1.54
K	白刺茂盛	表层壤土,底层砂土	220	220	19.11	6.18
L	有梭梭树生长	表层砂土,底层壤土	200	200	48.43	29.03
M	芦苇白刺共生	表层砂土,中层壤土,底层砂土	180	220	–	5.41
N	盐地碱蓬茂盛	表层砂土,底层壤土	140	170	64.17	11.40
O	芦苇稀疏	砂土	83	130	3.3	0.39
P	白刺茂盛	表层壤土,底层砂土	180	310	0.55	0.71
Q	白刺稀疏	表层砂土,中层壤土,底层砂土	180	350	2.28	2.74
R	白刺与芦苇分布	表层砂土,中层壤土,底层砂土	180	–	0.79	0.24
S	白刺稀疏	表层砂土,中层壤土,底层砂土	180	218	13.19	0.38
T	盐生植物稀疏	砂土	180	–	3.18	1.01
U	有梭梭树生长	砂土	180	–	–	0.18
V	白刺稀疏	砂土	180	–	–	7.12
W	盐生植物稀疏	壤土	180	–	53.82	37.57
X	盐生植物稀疏	壤土	180	–	3.18	1

选取芦苇区(A~C)和荒漠过渡区(I~L)7个典型样点,共计56个土壤样品,按1:5土水比例混合,制取土壤浸提液,用电导率测量仪测定浸提液电导率EC。然后使用ICS-5000+离子色谱仪测定土壤浸提液阴阳离子含量,分析浸提液的主要离子组成、总盐分浓度,选出代表性离子成分Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-,得出土壤浸提液总盐浓度y(g·L^{-1})和电导率x(μS·cm^{-1})相关关系:

$$y = 0.001x - 0.0938 \quad (1)$$

二者线性相关关系显著,确定性系数(R^2)为0.99。测定剩余土壤剖面样点浸提液电导率,利用式(1),计算这些土壤剖面样点的浸提液盐浓度,进而得到其土壤全盐量。

采用软件SPSS 25.0对采样点土壤剖面盐分分布进行系统聚类分析,系统聚类方法采用Q型聚类。利用Spearman相关性分析,分析土壤含盐量与土壤质地、水分、温度以及地下水埋深和矿化度之间的相关程度。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面盐分聚集类型

为探究土壤剖面盐分聚集规律,将24个样点土壤剖面不同位置(0~20 cm、20~60 cm以及60 cm以下)盐分的平均值,以欧氏距离为判断标准,进行Q型聚类分析。从图2可知,当欧氏距离为10~15时,24个样点的土壤盐分垂向分布呈现为4种聚型:表聚型、中聚型、底聚型和平均型。

由表2可知,表聚、中聚和底聚型的土壤盐分分别在0~20 cm、20~60 cm和60 cm以下聚集程度高,平均值分别为15.96 g·kg^{-1}、9.03 g·kg^{-1}、13.67 g·kg^{-1};表聚、中聚和底聚系数最大,分别为1.72、1.25和0.75。平均型土壤剖面不同深度盐分含量低(<3 g·kg^{-1}),且分布较为均匀。表聚、中聚和底聚样点分别占总样点数的16.7%、25%和8.3%,平均型样点占

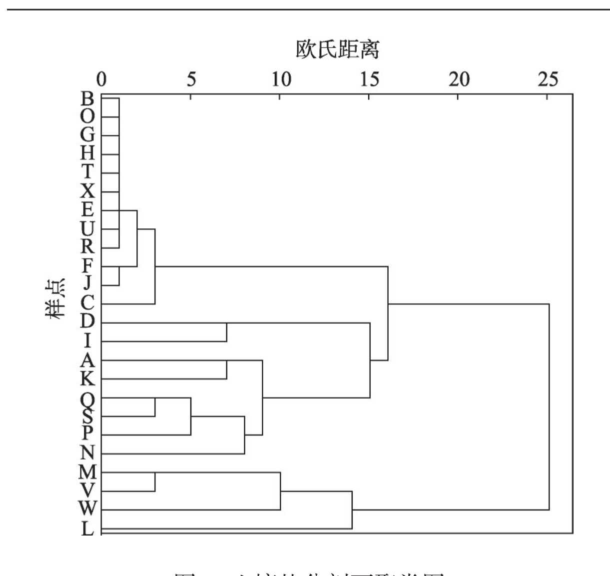


图2　土壤盐分剖面聚类图

Fig. 2　Cluster diagram of soil salt profiles

总样点数的50%。

表聚型样点(L、M、V、W)全部位于荒漠过渡区，地下水位埋深大(≥2 m)、矿化度高(平均值51.1 g·L^{-1})。由图3可知，由于近地表30 cm内土壤细颗粒(黏粒、粉粒)含量高，黏粒含量超过7%，盐分在此积聚，主要生长梭梭、白刺等耐旱、耐盐植物。

中聚型样点(A、K、N、P、Q、S)除A位于芦苇区的盐荒裸地外，其余样点位于荒漠过渡区，这些样点之间地下水埋深、矿化度变化大，如样点P、Q地下水矿化度<3 g·L^{-1}，其余样点地下水矿化度>10 g·L^{-1}(表1)。图3中，在埋深1 m附近土壤细颗粒(黏粒、粉粒)含量高，有利于盐分积聚，主要生长盐地碱蓬、梭梭、白刺等耐旱、耐盐植物。

底聚型样点D位于芦苇区的盐碱地，地下水埋深浅(70 cm)，地下水矿化度高(6.56 g·L^{-1})；在荒漠深处(样点I)，地下水埋深大(250 cm)，地下水矿化度极高(52.18 g·L^{-1})。由图3可知，底聚型黏粒含量由表层到底层逐渐增大，在最底层超过30%，有利于盐分在底部聚集并向上输送，剖面盐分含量高。

平均型样点占芦苇区总数的75%，属于非盐渍土。该类型区地下水矿化度低(平均值为2.6 g·L^{-1}，大都小于3.5 g·L^{-1})，地下水埋深浅，芦苇生长茂盛。平均型黏粒含量小，大部分未超过4%。

4种聚型盐分含量与黏粒含量分布较为一致。土壤剖面细颗粒(黏粒、粉粒)的分布是盐分垂向分布差异的重要因素，进而影响植被类型。

2.2　土壤盐分与影响因子之间相关性分析

分析土壤含盐量、质地(黏粒、粉粒和砂粒含量)、水分(含水率)、温度以及地下水矿化度和地下水埋深比值之间的相关程度。利用24个采样点不同深度的土壤剖面数据对上述要素进行相关分析(表3)。结果表明：土壤含盐量受含水率、地下水矿化度和地下水埋深比值、温度以及质地影响显著(通过显著性水平1%的检验)，与地下水矿化度和埋深比值、细颗粒(黏粒、粉粒)含量和含水率呈正相关关系，与粗颗粒(砂粒)含量和温度呈负相关关系。

2.3　土壤含盐量随地下水矿化度和埋深变化的定量表述式

选择地下水矿化度与埋深比值m/h分析其与土

表2　土壤剖面含盐量分布统计特征

Tab. 2　Statistical characteristics of salt content distribution in soil profiles

盐分聚型	剖面深度/cm	含盐量/(g·kg^{-1})			积聚系数		
		最大值	最小值	平均值	表聚系数	中聚系数	底聚系数
表聚型	0~20	29.03	3.68	15.96	1.72	0.23	0.22
	20~60	10.03	2.34	4.79			
	>60	11.97	0.66	4.52			
中聚型	0~20	10.14	0.39	3.38	0.26	1.25	0.31
	20~60	17.47	3.58	9.03			
	>60	8.85	1.43	3.83			
底聚型	0~20	9.32	8.45	8.88	0.39	0.42	0.75
	20~60	10.49	8.23	9.36			
	>60	16.66	10.68	13.67			
平均型	0~20	2.51	0.16	0.82	0.48	0.50	0.52
	20~60	2.27	0.18	0.84			
	>60	2	0.24	0.87			

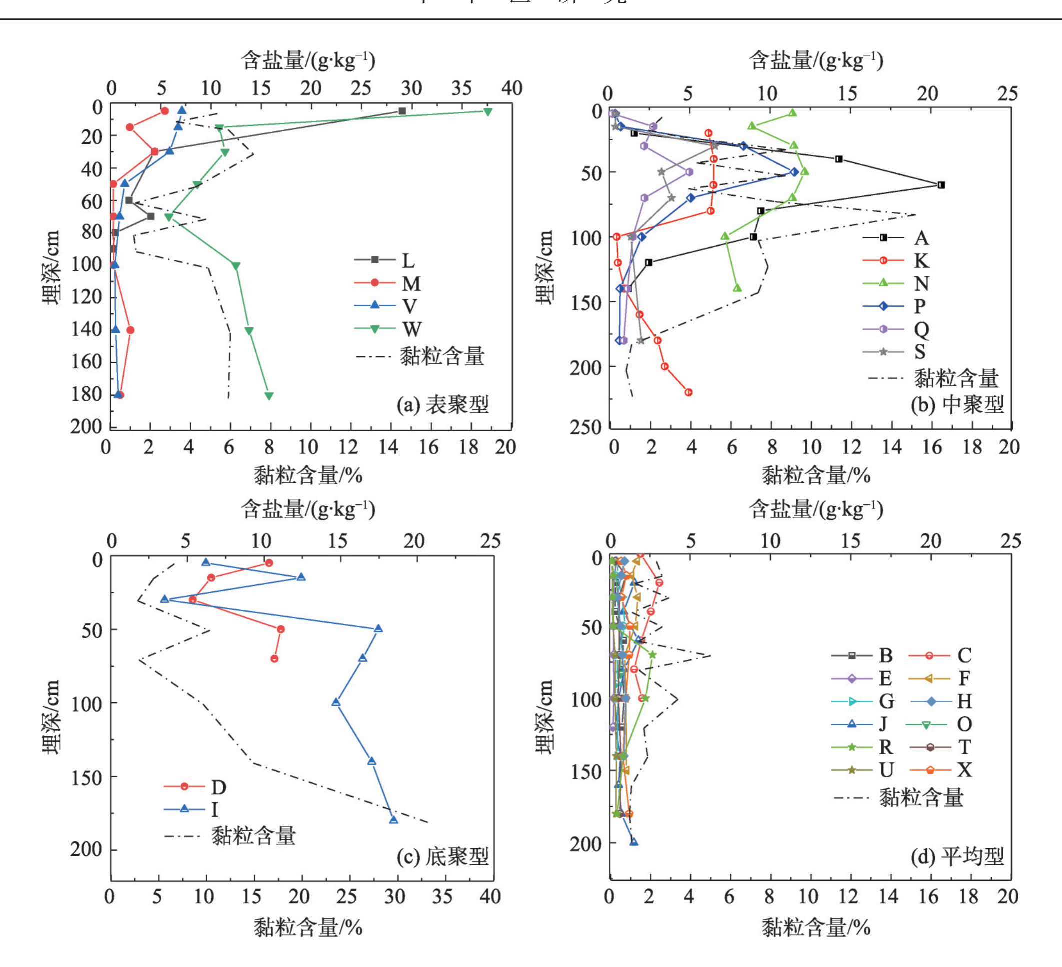


图3 土壤剖面盐分分布类型及黏粒含量分布

Fig. 3 Salt distribution types and clay content distribution in soil profiles

表3 影响因子Spearman相关系数矩阵

Tab. 3 Spearman correlation coefficient matrix of influence factors

影响因子	土壤含盐量	含水率	地下水矿化度与埋深比值	地下水埋深	土壤温度	黏粒	粉粒	砂粒
土壤含盐量	1							
含水率	0.440**	1						
地下水矿化度与埋深比值	0.452**	0.497**	1					
地下水埋深	0.163	-0.458**	-0.401**	1				
温度	-0.323**	-0.608**	-0.693**	0.486**	1			
黏粒	0.652**	0.409**	0.226*	0.180*	-0.036	1		
粉粒	0.659**	0.432**	0.224*	0.178*	-0.043	0.973**	1	
砂粒	-0.665**	-0.431**	-0.219*	-0.178*	0.055	-0.984**	-0.998**	1

注:*和**分别表示在显著性水平a=0.05和a=0.01条件下相关性显著。下同。

壤含盐量S(g·kg^{-1})之间的定量关系,采用下列指数方程表述:

$$S = ae^{bm/h} \quad (2)$$

式中:a、b为常数。

芦苇区(A~H)地下水位高、埋深浅(平均埋深123 cm)。荒漠过渡区(I~X)受青土湖侧向入渗水影响减弱,地下水埋深加大(除N、O点外,其他>2 m),地下水面以上毛细作用减弱。为此,利用式(2)分别拟合芦苇区、荒漠过渡区和全区(包括芦苇区和荒漠过渡区)土壤剖面0~20 cm、20~60 cm以及

60 cm以下$S \sim m/h$关系。

由图4和表4可知,S随m/h呈指数型增加,其中,芦苇区0~20 cm、20~60 cm剖面$S \sim m/h$拟合的确定性系数R^2超过0.7。研究区60 cm以下$S \sim m/h$拟合差,说明芦苇区、荒漠过渡区地下水对土壤含盐量的影响程度存在差异。

利用表4和图4率定的指数方程,推求4种聚型分布特征及其临界条件。在芦苇区,平均型最大含盐量(<3 g·kg^{-1})对应的m/h值<40 g·L^{-1}·m^{-1},3个不同深度含盐量接近;当m/h值>40 g·L^{-1}·m^{-1},表现出中聚型特征,20~60 cm处含盐量急剧上升,超过其他深度含盐量。

荒漠过渡区土壤剖面含盐量均值较分散,变异性较大。当m/h值极小时,土壤剖面含盐量<3 g·kg^{-1},盐分聚型以平均型为主;当m/h<23 g·L^{-1}·m^{-1},20~60 cm土壤剖面含盐量最高,以中聚型为主;当m/h值>23 g·L^{-1}·m^{-1},0~20 cm土壤剖面含盐量急剧上升,表现出表聚型特征。

由此可见,随着m/h值的增大,芦苇区盐分聚型从平均型到中聚型,荒漠过渡区从平均型到中聚型再到表聚型的方式过渡。盐分聚型的差异导致了植被类型的差异,根据表4公式,通过控制地下水矿化度和埋深,进而改变土壤盐分聚型,为尾闾湖绿洲和荒漠过渡区植被恢复提供参考。

对于特定取值范围的地下水矿化度,地下水埋深为主要影响因素。$S \sim m/h$关系可简化为$S \sim h$关系(图5)。对于地下水矿化度低(2.28~3.17 g·L^{-1}的样点)和地下水矿化度高(>20 g·L^{-1})的样点,拟合

表4 $S \sim m/h$关系表述式

Tab. 4 Expression of $S \sim m/h$ relation

植被区	土层/cm	$S \sim m/h$	
		表述式	R^2
芦苇区	0~20	$S=0.5861e^{0.0406m/h}$	0.73**
	20~60	$S=0.5057e^{0.056m/h}$	0.78**
	>60	$S=0.5686e^{0.0072m/h}$	0.52**
荒漠过渡区	0~20	$S=0.594e^{0.0914m/h}$	0.61**
	20~60	$S=1.889e^{0.0416m/h}$	0.42*
	>60	$S=0.7917e^{0.0234m/h}$	0.58**
研究区	0~20	$S=0.6757e^{0.0529m/h}$	0.50**
	20~60	$S=0.9968e^{0.0501m/h}$	0.51**
	>60	$S=0.8079e^{0.0099m/h}$	0.29*

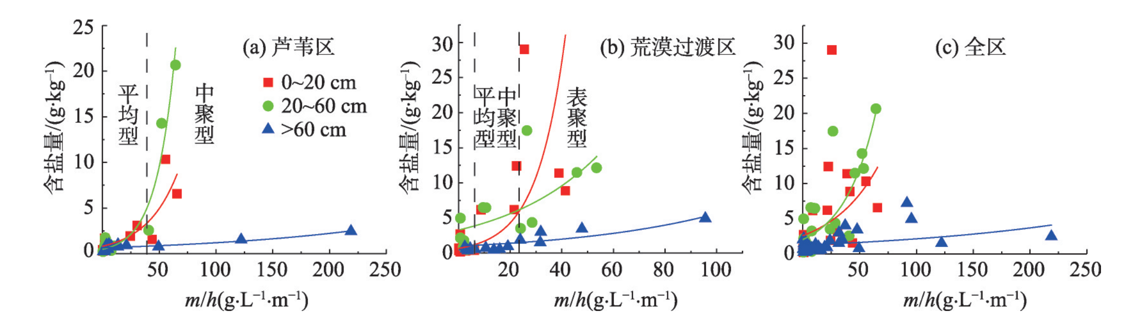


图4 土壤含盐量S与m/h关系

Fig. 4 Relationship between soil salinity S and m/h

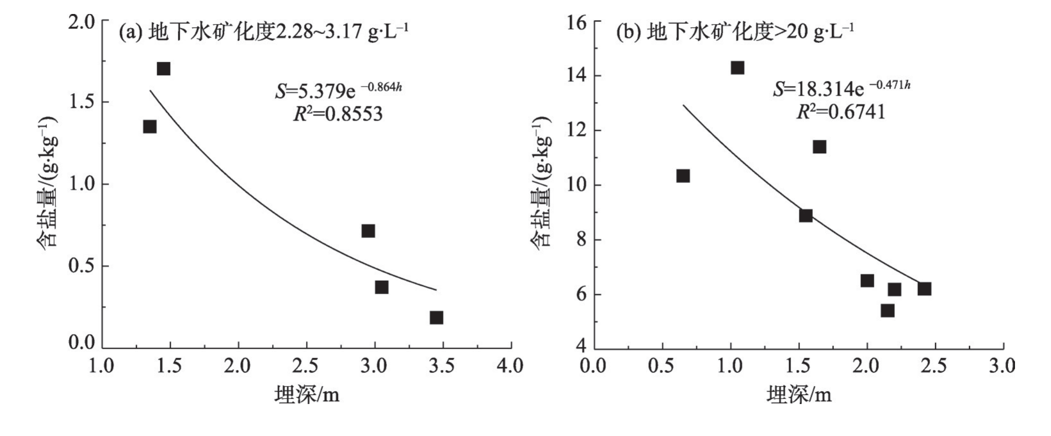


图5 表层土壤含盐量与埋深关系

Fig. 5 Relationship between salt content and burial depth of topsoil

样点表层土壤含盐量 $S\sim h$ 关系，得出 $S=5.379e^{-0.864h}$、$S=18.314e^{-0.471h}$。由此拟合式推求出下列结论：当地下水埋深从1.5 m增大到2.5 m，地下水矿化度低和高的区域表层土壤含盐量分别降低0.85 g·kg^{-1}、3.4 g·kg^{-1}。说明与地下水矿化度较低区域相比，地下水矿化度高的区域水位下降（上升）对土壤盐分影响大。

结合样方调查，分别采用土壤表层含盐量不超过2 g·kg^{-1}、6 g·kg^{-1}作为芦苇和荒漠典型植被（如白刺）生长的临界值，利用拟合的 $S\sim h$ 式，推求芦苇区的临界埋深为1.15 m，荒漠过渡区的临界埋深为2.37 m。当地下水埋深大于临界埋深时，可有效防止土壤表层的积盐，有利于防止土壤盐渍化和植被恢复。

3 结论与讨论

通过对青土湖周边土壤剖面的土壤盐分、含水率、温度、土壤质地、地下水等因素的实测和分析，得出土壤剖面盐分聚集分布特征，建立了土壤含盐量与地下水矿化度和埋深比值之间定量关系，以及地下水低矿化度和高矿化度区土壤表层含盐量与地下水埋深之间关系。结果表明：

（1）土壤含盐量受含水率、m/h、温度以及质地影响显著，与地下水矿化度和埋深比值、细颗粒（黏粒、粉粒）含量和含水率呈正相关关系，与粗颗粒（砂粒）含量和温度呈负相关关系。芦苇区和荒漠过渡区土壤盐分及其其他要素有显著差异。

（2）土壤剖面盐分分布主要类型有表聚型、中聚型和平均型，芦苇区主要为平均型，盐渍化程度较低；中聚型、表聚型样点大部分位于荒漠过渡区，土壤盐渍化威胁较大。土壤剖面盐分聚型与土壤细颗粒含量（黏粒、粉粒）垂向分布一致，细颗粒含量高有利于盐分累积。

（3）芦苇区和荒漠过渡区不同深度土壤盐分与地下水矿化度和埋深比值的关系式表明，地下水矿化度和埋深比值增大，芦苇区从平均型过渡到中聚型、荒漠过渡区从平均型到中聚型再到表聚型的变化规律。

（4）通过分析地下水矿化度低和高的地区土壤表层含盐量与地下水埋深之间关系，得出维持芦苇和荒漠典型植被（如白刺）生长的土壤表层含盐量临界值分别不超过2 g·kg^{-1}、6 g·kg^{-1}时，地下水临界埋深为1.15 m和2.37 m。

由此可见，土壤中盐分累积受土壤质地本身以及地下水埋深和矿化度影响，而土壤盐分的差异又导致了植被分布的差异。青土湖上游淡水引入，有利于降低湖区及周边地下水矿化度和土壤含盐量。芦苇属于假盐生植物，不耐盐，在低地下水矿化度和土壤低盐分条件下，适宜生存。因此，在蒸散发强力的夏季，芦苇区地下水位控制在较浅埋深（如1.15 m），可防止表土盐渍化，有助于维护芦苇绿洲的稳定。荒漠过渡区土壤盐渍化形成和防治相对复杂，一方面，大面积水域退缩形成的湖相沉积物斑块，黏粒含量高，易于土壤水分和盐分积聚；另一方面，随着湖区入渗的淡水影响减弱，地下水埋深加大、矿化度也增大，只有旱生、盐生植被生存。因此，在湖泊入渗水影响区，高地下水矿化度条件下，需要控制地下水埋深（如2.37 m），降低潜水蒸发导致的土壤表层盐分不断积聚，同时也能向植被根系层提供一定的水分，可保持白刺、盐爪爪、猪毛菜等盐生植被的稳定，以改善青土湖周边植物群落演替的环境。

参考文献（References）：

[1] 王遵亲, 祝寿全, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei, et al. Salt Affected Soils in China [M]. Beijing: Science Press, 1993.]

[2] 丁宏伟. 石羊河流域绿洲开发与水资源利用[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 416–421. [Ding Hongwei. Oasis development and water resources utilization in the Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(4): 416–421.]

[3] 刘淑娟, 袁宏波, 刘世增, 等. 石羊河尾闾水面形成区土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 285–289. [Liu Shujuan, Yuan Hongbo, Liu Shizeng, et al. Acteristics of soil particle-fractal dimension after formation of water area in tail-streams of Shiyang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 285–289.]

[4] 陈政融, 刘世增, 刘淑娟, 等. 芦苇和白刺空间格局对青土湖生态输水的响应[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 1960–1968. [Chen Zhengrong, Liu Shizeng, Liu Shujuan, etal. Responseof form *Phragmites australis* and form *Nitraria tangutorum* after ecological water delivery to Qingtu Lake[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(12): 1960–1968.]

[5] 石万里, 刘淑娟, 刘世增, 等. 人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析. 生态学报, 2017, 37(18): 5951–5960. [Shi Wanli, Liu Shujuan, Liu Shizeng, et al. Effect of artificial wa-

ter transfer on ecological environment of Qingtu Lake in the lower reaches of Shiyang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 5951-5960.]

[6] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 民勤沙区主要植物群落退化特征及其演替趋势分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 382-388. [Chang Zhaofeng, Zhong Shengnian, Han Fugui, et al. Degengeration characteristics and degengeration succession trend of main plant communities in Minqin County[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 382-388.]

[7] 刘虎俊, 刘世增, 李毅, 等. 石羊河中下游河岸地下水位变化与其植被响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335-341.[Liu Hujun, Liu Shizeng, Li Yi, et al. Response of riparian vegetation to the change of groundwater level at middle and lower reaches of the Shiyang River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 335-341.]

[8] 程国帅, 刘东伟, 温璐,等. 干涸盐湖地下水和土壤化学属性对自然植被分布的控制作用[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 88-97. [Cheng Guoshuai, Liu Dongwei, Wen Lu, et al. Effects of groundwater and soil chemical properties on distribution of natural vegetation around Playa[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 88-97.]

[9] 王雅梅, 张青青, 徐海量, 等. 生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1186-1193. [Wang Yamei, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Change of plant diversity in the Taitema Lake area before andafter implementing the ecological water conveyance[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1186-1193.]

[10] 李浙华, 李生宇, 李丙文, 等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160-167. [Li Zhehua, Li Shengyu, Li Bingwen, et al. Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 160-167.]

[11] 李宏侠, 杨晓东, 吕光辉, 等. 艾比湖自然保护区盐生植物的分布及其水分利用效率[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 370-378.[Li Hongxia, Yang Xiaodong, Lyu Guanghui, et al. Distributionand water use efficiency of halophytes in the Ebinur Lake Nature Reserve [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 370-378.]

[12] 杜金龙, 靳孟贵, 欧阳正平, 等. 焉耆盆地土壤盐分剖面特征及其与土壤颗粒组成的关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2008, 33(1): 131-136. [Du Jinlong, Jin Menggui, Ouyang Zhengping ,et al. Characteristics of soil salinity profiles and relationship between salinity and soil particle composition in Yanqi Basin of Xinjiang, China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(1): 131-136.]

[13] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展, 2007,17(8): 1091-1097. [Fu Qiuping, Zhang Jianghui, Wang Quanjiu, et al. Dynamic characteristics of soil salt content in Tarim River Basin[J]. Progress in Natural Science, 2007,17(8): 1091-1097.]

[14] 吕云海, 海米提·依米提, 刘国华, 等. 于田绿洲土壤含盐量与地下水关系分析[J]. 新疆农业科学, 2009, 45(6): 1093-1097. [Lyu Yunhai, Haimiti Yimiti, Liu Guohua, et al. Analysis on the relation between soil salt content and groundwater in Yutian Oasis[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 45(6): 1093-1097.]

[15] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210. [Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202-1210.]

[16] 张光辉, 刘春华, 严明疆, 等. 环渤海平原土壤盐分不同聚型的的水动力学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1873-1879. [Zhang Guanghui, Liu Chunhua, Yan Mingjiang, et al. Moisture dynamics characteristics of the soils profile of different salinity poly types in the Bohai Sea Plain[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(6): 1873-1879.]

[17] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-64. [Yao Rongjiang, Yang Jinsong, Jiang Long, et al. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 56-64.]

[18] 白由路, 李保国. 黄淮海平原土壤盐渍化状况的数值分类[J]. 土壤通报, 2001(增刊 1):8-13. [Bai Youlu, Li Baoguo. Quantitative classification of soil salinization in the Huang Huai Hai Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(Suppl.1): 8-13.]

[19] 李彬, 史海滨, 妥德宝, 等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布——以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 663-673. [Li Bin, Shi Haibin, Tuo Debao, et al. Soil salinity profile characteristics and its spatial distribution before and after water saving[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 663-673.]

[20] 马俊梅, 郭春秀, 何芳兰, 等. 民勤绿洲外围不同立地类型黑果枸杞种群分布格局[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 122-130. [Ma Junmei, Guo Chunxiu, He Fanglan, et al. Spatial distributionpattern of *Lycium ruthenicum* in different site types in periphery of the Minqin oasis[J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (1): 122-130.]

[21] 陈政融, 刘世增, 刘淑娟, 等. 青土湖水面形成对区域典型植被分布的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 177-183. [Chen Zhengrong, Liu Shizeng, Liu Shujuan, et al. Effect of water body forming on the distribution of typical vegetation in Qingtu Lake [J].Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(21): 177-183.]

[22] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ /T166-2004 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. [State Environmental Protection Administration of China. Technical Specification for Soil Environmental Monitoring: HJ /T166- 2004[S]. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 2004.]

[23] 美国农业部土壤质地: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/nedc/training/soil/?cid=nrcs142p2_054167#open-newwindow.

Study on salt distribution characteristics and mathematical expression of the soil profile in Qingtu Lake

LIU Xiu-qiang[1,2], CHEN Xi[1,2], ZHANG Yang-yang[1,2], CHENG Qin-bo[3]

(1. *Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China;*2. *Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China;* 3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *Jiangsu, China*)

Abstract: In this paper, 24 samples of soil and groundwater in different depths were collected from the reed area of Qingtu Lake and the transition area of desert vegetation in the lower reaches of the Shiyang River Basin. Environmental factors, such as soil salt content and texture, groundwater depth, and mineralization degree, were measured. The distribution characteristics, main influencing factors, and quantitative expression of salt content in the soil section of the transition area between the reed area and desert vegetation were analyzed. The results show that the salt concentration of soil profile in the reed area is mainly average type and is mainly surface type (0−20 cm) and middle type (20−60 cm) in the desert transition area. The relationship between soil salt "*S*" and the ratio of groundwater salinity "*m*" to burial depth "*h*" is an exponential type ($S = ae^{bm/h}$); with the increase of *m/h* value, the salt accumulation pattern in the reed area is from average type to middle type, and the transition pattern in the desert transition area is from average type to middle type to surface type. When the salt content of the soil surface layer maintaining the growth of reed and desert-typical vegetation (such as *Nitraria tangutorum*) does not exceed 2 and 6 $g \cdot kg^{-1}$, respectively, the critical burial depth of groundwater is 1.15 and 2.37 m. It can provide a scientific basis for ecological groundwater level regulation and vegetation restoration.

Keywords: *Phragmites australis*; desert vegetation; salt distribution; soil texture; groundwater; Qingtu Lake